

**A 79135. sz. OTKA Kutatási Program zárójelentése**  
**Az epikarsztos rendszerek természeti és antropogén folyamatok hatására**  
**bekövetkező változásainak komplex vizsgálata két hazai mintaterületen**

**Bevezetés**

Zárójelentésünkben a Gömör-Tornai-karszton és Tapolcai-karszton 2009–2012. között az OTKA által támogatott (79135 sz. OTKA pályázat) epikarsztos kutatásainkról, ill. karsztökológiai vizsgálatainkról adunk számot. A négy éves futamidejű projekt keretei között egyrészt az évszázados tájhasználat következtében kialakult karsztos tájváltozásokat követtük nyomon a vizsgált területeken, másrészt az epikarsztos rendszerekben, a hidro-, bio- és pedoszférában egyaránt jelentkező változásokat vizsgáltuk.

Az epikarsztos rendszer rendkívül összetett, a benne végbemenő folyamatokat az abiotikus (kőzet, talaj, víz, éghajlati tényezők) és biotikus (növény- és állatvilág, mikrobiológiai szervezetek) tényezők kölcsönhatása határozza meg (Jakucs 1980, Bárány-Kevei 1998). Az OTKA által támogatott alapkutatás fő célja ezeknek a tényezőknek a megismerése és a közöttük ható bonyolult kölcsönhatásoknak a feltárása volt.

A vizsgálatok céljára kiszemelt helyszínek megválasztásánál arra törekedtünk, hogy minél többféle módszerrel dolgozva (növényzeti-, talajtani-, vízkémiai és mikrobiológiai vizsgálatok, biológiai vízminősítés) alkalmasak legyenek a jelen ökológiai állapot felmérésére. A fenti szempontoknak a vizes élőhelyek, a karsztos mélyedésekben kialakult tavak környéke felel meg leginkább. Mindezek figyelembe vételével két eltérő jellegű karsztos tájon (Gömör–Tornai-karszt és Tapolcai-karszt) összesen tíz mérési helyet választottunk ki karsztos tavak környezetében. A Gömör–Tornai-karszton a Vörös-, Aggteleki, Derenki- és Papverme-tó környékén, a Tapolcai-karszton az Alsó-Cser-, Pokol- és Névtelen-tó közelében jelöltük ki a vizsgálatok helyszíneit, főleg töbröket, ahol a mikroklima mérések számára is kedvező feltételeket találtunk. A talaj az a szubsztrátum, amelyben az abiotikus és a biotikus tényezők hatása összegződik, ezért vizsgálatainkat főleg a talajban lejátszódó folyamatokra irányítottuk.

A felszín és az epikarszt biotikus tényezőinek (felszíni növényborítás, talaj mikrobaközösségek változásainak) karsztkorróziós folyamatokra gyakorolt hatásvizsgálatát a terepen gyűjtött talajminták laboratóriumi elemzésével, ill. helyszíni mérésekkel végeztük. Elsődleges célunk a karsztos oldódás folyamatának, területi és lokális különbségeinek (Aggteleki-karszt, Bakony) az eddigieknél pontosabb megismerése volt újszerű mikrobiológiai, növényökológiai vizsgálatokkal, a talaj biológiai aktivitásának (szén-dioxid produkciójának) mérésével egyrészt természetes, másrészt emberi behatásoknak kitett karsztos környezetekben történt.

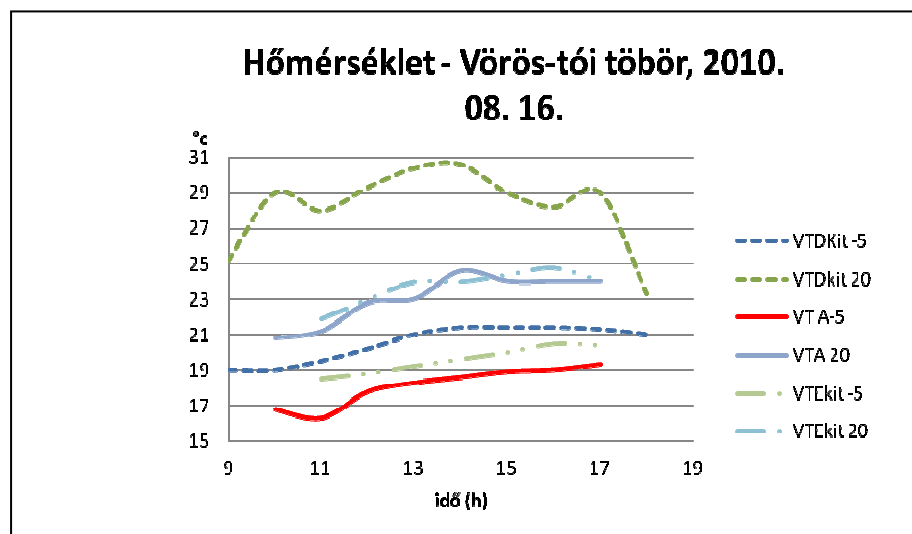
**Az epikarsztos rendszer abiotikus és biotikus tényezőinek vizsgálatának eredményei**

**Mikroklima és talajklíma vizsgálatok**

Több kutató (Jakucs 1971; Zámbo 2001; Keveiné Bárány 2009) rámutatott már arra a tényre, hogy a meteorológiai tényezők, sőt a mikroklimatikus tényezők is szerepet játszanak a talajélet aktivitásában és azon keresztül a talajlevegő szén-dioxid termelődésének alakulásában. *A klíma morfogenetikai tényező minden közettípus lepusztulási folyamatának irányításában, a karsztrendszerben azonban a karsztfejlődés dinamizmusát biztosító ökofaktor* (Keveiné Bárány 2009). A karsztos tájak dolinás térszínein a zárt mélyedésekben szükségszerűen kialakulnak a karsztos dolinák mikroklima-térsegei, ahol a kitettségnek jelentős szerepe van az energia bevételi különbségek térbeli és időbeli változásában. Mindez hatással van a léghőmérséklet, a talajhőmérséklet alakulására, a talajnedvesség helyi különbségeinek kialakulására, a töbör növényborítására, ezeken a tényezőkön keresztül a talaj mikrobiális aktivitására, végső soron a karszttalajok karsztkorróziós folyamatainak térbeli különbségeinek kialakításában (Keveiné Bárány 2009).

Éppen ezért a dolinás térszíneken a talajlevegő szén-dioxid tartalmának vizsgálatával párhuzamosan mindig felállítottunk mikroklima mérésre szolgáló állomást, ahol 3 különböző magasságban (0, 20 és 100 cm-en) mértük a levegő hőmérsékletét, két különböző magasságban (20 és 100 cm-en) a párolgást, kétóránként a relatív légnedvességet és a szélutatót. Mind a Gömör-Tornai-karszton, mind a Tapolcai-karszton – ahol lehetett – töbröket választottunk mérési helyszínnek, és minden helyszínen három állomást állítunk fel, egyet-egyét a töbör északi, ill. déli peremén, ill. a töbör alján, hogy a kitettség hatását is vizsgálhassuk. A meteorológiai jelenségek és a talajban mért értékek (talajhőmérséklet, talajnedvesség, pH, szén-dioxid koncentráció) között kerestük az összefüggéseket, hogy a térbeli különbségeket, a napszakos és évszakos változásokat megismerjük. 2010 óta a fenti egyedi méréseken kívül a talajba beásott adatgyűjtők segítségével az alábbi paraméterek folyamatos regisztrációjára nyílt lehetőségünk:

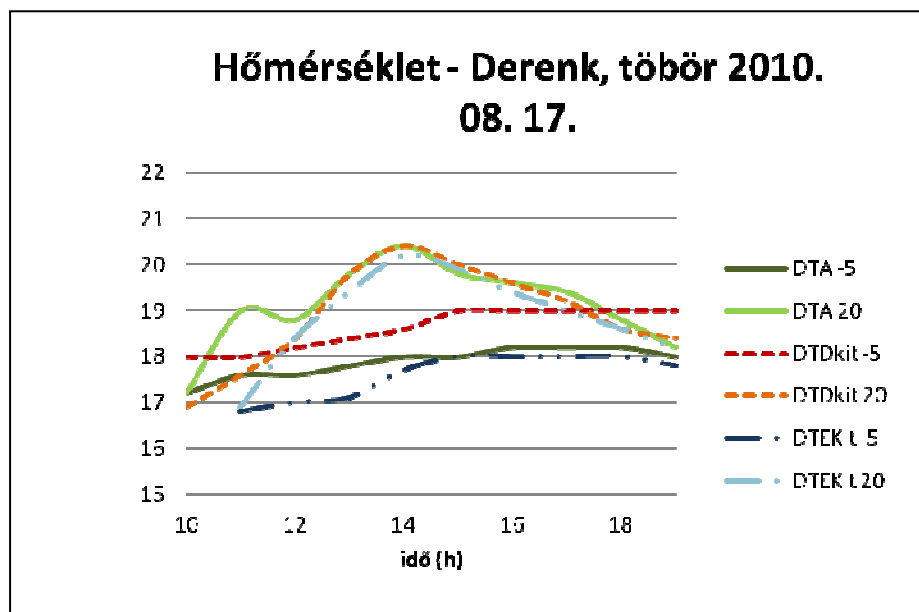
hőmérséklet – 0,1°C pontosságú Pt-100 talajhőmérővel,  
talajnedvesség – Eijkelkamp gipszblokkokkal,  
pH – 0,05 pH-egység pontosságú Hanna típusú talaj pH-szenzorral.



1. ábra A Vörös-tói töbörben mért talajhőmérsékleti (-5 cm mélyen) és léghőmérsékleti értékek (20 cm magasságban)

Az adatgyűjtők és a hozzá csatlakoztatható szenzorok lehetővé tették, hogy a napi dinamikájú szén-dioxid mérések alkalmával, a talaj egyéb fizikai paramétereinek változását folyamatosan (10 perces időközönként) regisztráljuk. E vizsgálatok egyben alapul szolgáltak a mikrobiológiai vizsgálatok eredményeinek kiértékeléséhez.

**A Gömör-Tornai-karszton** a Vörös-tó melletti töbörben (VT) és a Derenki-töbörben (DT) végeztünk több alkalommal mikroklíma méréseket, amelyek rávilágítottak a két eltérő alakú, méretű, fedettségű töbör mikroklímája közötti különbségekre, az egyes mérési helyeken a kitettségéből származó különbségekre és különösen a napi hőmérsékletjárásban megmutatkozó sajátosságokra. A Vörös-tó melletti töbörben a töbör északi (VTE) és déli peremén (VTD), ill. a töbör alján (VTD) felállított mikroklíma állomásokon mért hőmérsékleti és párolgási adatok szembetűnően jelezték a kitettségéből adódó különbségeket (1. ábra). A fedettség dolina mikroklímájára gyakorolt hatását ugyancsak feltárták a két praktikus kiválasztott töbörben egy időben végzett méréseink. A Vörös-tó melletti töbör északi peremére telepített mérőállomás (VTE) sziklagyepes területen létesült, míg a másik kettő (VTA és VTD) az erdő lombosátora alatt. A Derenki-töbör egész területét egységesen erdő takarja, amely a mérési eredményeink szerint tompította az egyes mérőállomások (DTE, DTA és DTD) közötti kitettségéből adódó különbségeket (2. ábra).



2. ábra A Derenki-töbörben mért talajhőmérsékleti (-5 cm mélységben) és léghőmérsékleti értékek (20 cm magasan)

### A talajlevegő CO<sub>2</sub> tartalmának évszakos és napszakos változása

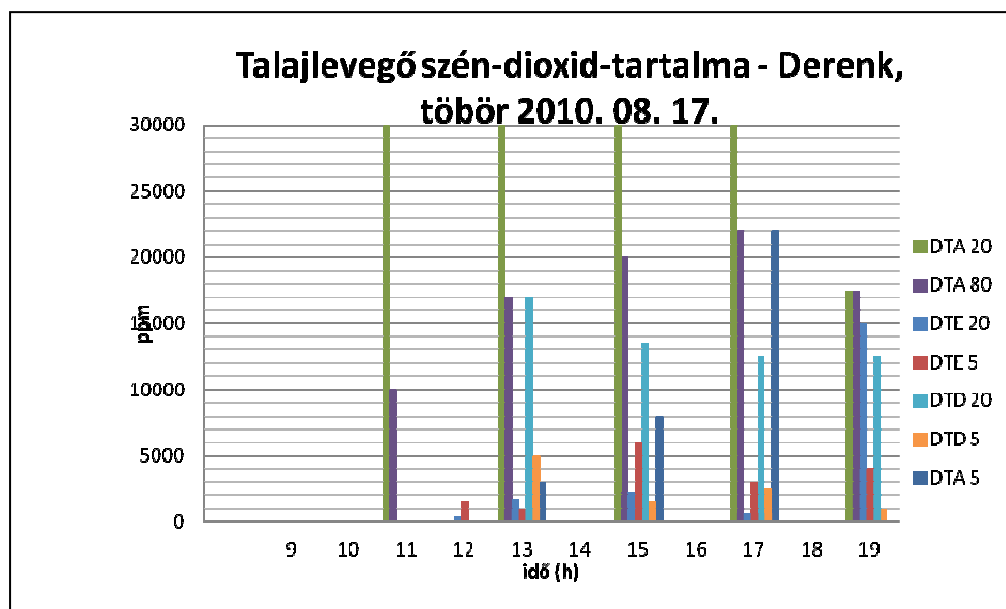
A talajlevegő szén-dioxid koncentrációjának a mérése a terepen Gastec Model GV-100 szén-dioxid pumpával és a hozzá tartozó 2L ill. 2LL típusú mintavevő csövekkel történt a mikroklíma mérésekkel párhuzamosan, ugyanazon helyszíneken. A mérési eredmények nagy eltéréseket mutatnak a vizsgált helyszíneken (VT, DT, TA), néhány 100 ppm értéktől 3% (3%=30000) ppm értékig terjednek. Ez az általunk használt 2L típusú cső felső kimutatási határértéke. A méréseket különböző évszakokban egy teljes napon, kétórás időközönként végeztük. Az alkalmazott módszer alkalmas volt

az egyes helyszínek közötti, illetve talajszelvény menti eltérő mélységek közötti különbségek, továbbá a napi dinamika és az évszakai különbségek kimutatására.

A több éven keresztül a talajlevegőből mért CO<sub>2</sub> koncentráció értékeinek alakulását, a mérések legfontosabb eredményeit és a környezeti, mikroklimatikus tényezőkkel való összefüggéseit az alábbiakban foglaljuk össze:

Az **Aggteleki-karszton** a Vörös-tó melletti töbörben (VT) a talajlevegő CO<sub>2</sub> koncentrációjának maximális (>3%-os) értékét minden esetben a töböralj (VTA) 20 cm-es mélységében mértük. A töböralj 5 cm-es talajmélységében ezzel szemben rendre jóval alacsonyabb, 1-2000-es ppm értékeket kaptunk. A töböraljhoz hasonlóan szintén hűvösebb, nedvesebb déli lejtőn (VTD) regisztráltunk rendre 10000 ppm (1%) feletti értékeket. Hasonló volt a helyzet a Derenki-tó (DT) melletti töbörben is. A töböraljon (DTA) 80 cm-es mélységben is végeztünk szén-dioxid-méréseket, amelyek értékei (1-2%) kb. fele-kétharmada volt a 20 cm-en kapott >3%-os értékeknek. A vizsgálati időszakban végzett mérési eredményeink jó egyezést mutatnak a korábban publikált szakirodalmi adatokkal (Jakucs 1971; Zámbo 2001) és egyértelműen azt igazolják, hogy a talajban a szén-dioxid-termelés mértéke a mélységgel egyenesen arányosan nem növekszik, hanem ~ 20-30 cm-en maximuma van.

A különböző évszakokban és helyszíneken végzett méréseink azt is beigazolták, hogy a CO<sub>2</sub> koncentráció értékei napközben emelkedő tendenciát mutatnak – ha egyéb zavaró tényezők (időjárási tényezők) nem szólnak közbe – szinte mindenhol a legmagasabb szén-dioxid koncentrációt késő délután mértük, este a hőmérséklet csökkenésével a szén-dioxid koncentráció is csökkent. Ez a tendencia a talaj mélyebb szintjében végzett szén-dioxid-méréseknél szembetűnőbben jelentkezett (3. ábra).

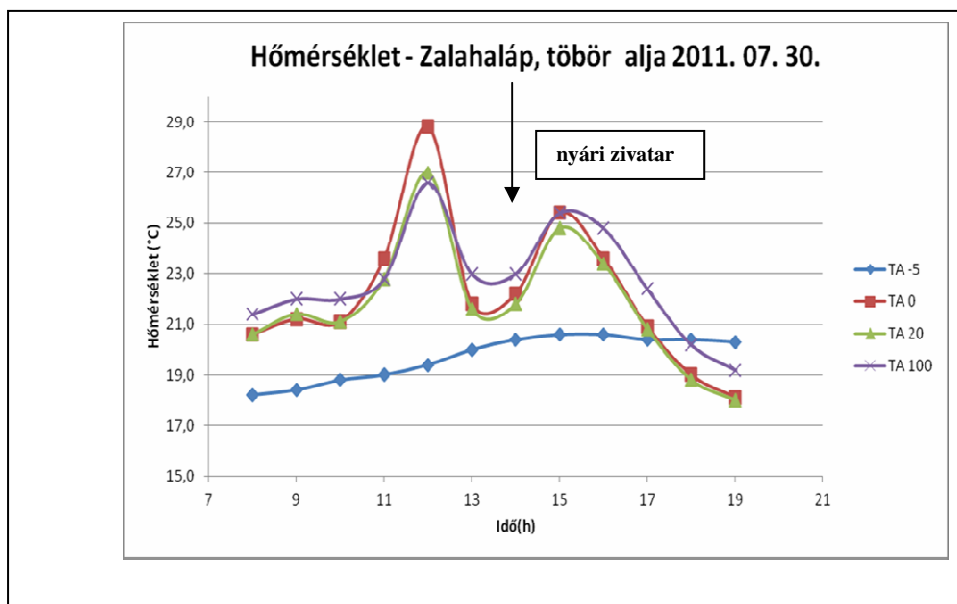


3. ábra A Talajlevegő szén-dioxid koncentrációjának (ppm) változása a Derenki-töbörben (-5, -20, -80 cm mélységben)

A **Tapolcai-karszton** végzett CO<sub>2</sub> koncentráció mérések is ugyanazokat a tendenciákat mutatták, mint amiket az Aggteleki-karszton tapasztaltunk. A TA töbör alján (TAA) a talaj kb. 20 cm-es mélységében mértük a legmagasabb CO<sub>2</sub> koncentráció értéket, ám az ott mért értékek jóval kisebbek (3000-15500 ppm) voltak átlagosan az Aggteleki-karszt töbreiben tapasztaltakhoz képest. Az eltéréseket valószínűleg az eltérő talajadottságok (eltérő textúra, szerves és ásványi összetevők különbsége és ezzel együtt a biológiai aktivitás eltérő mértéke) okozzák.

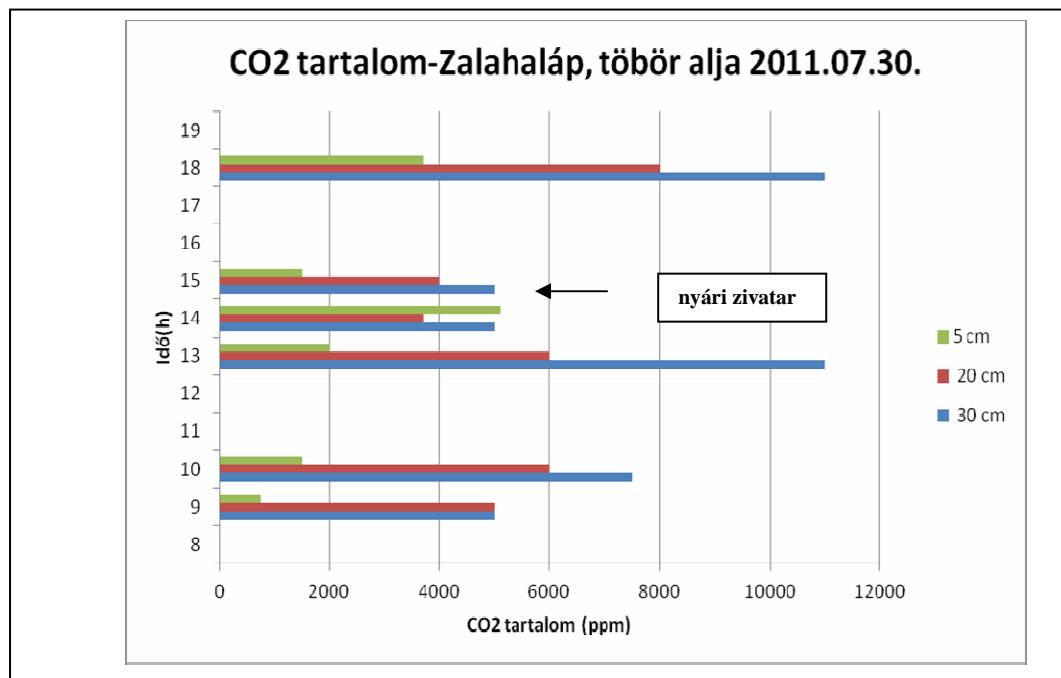
#### A mikroklíma és a mikrobiális szén-dioxid termelés közötti összefüggések vizsgálata terepi mérésekkel

A meteorológiai jelenségek (mikroklíma), a talaj állapota (léghőmérséklet, talajhőmérséklet, légnedvesség, páratartalom, csapadék, talajnedvesség, pH) és a talajban mért CO<sub>2</sub> koncentráció értékei közötti pontosabb összefüggések feltárása érdekében terveztük meg mikroklíma vizsgálatainkat. Számos vizsgálatunk alátámasztotta a mikrobiális eredetű CO<sub>2</sub> koncentráció előző fejezetben ismertetett trendjét. Feltételeztük, hogy az időjárási tényezők (hőmérséklet, csapadék, légnyomás) gyors változásai hatással vannak a talajban élő mikrobák életfolyamataira és a talajlevegő CO<sub>2</sub> koncentráció változásaira. ahhoz azonban, hogy ezt mérésekkel is alátámaszthassuk, szerencsés körülményekre volt szükségünk. Ilyen szerencsés esetnek voltunk tanúi 2011. július 30-án a Tapolcai-karszton. A mikroklíma méréseket egy derűs nyári reggelen kezdtük, ám a fokozatos felmelegedést kora délután egy nyári zápor megszakította, amely gyors lehűléssel és a levegő páratartalmának megemelkedésével járt. Késő délutánra azonban ismét kiderült az ég, emelkedett a hőmérséklet, csökkent a páratartalom egészen alkonyatig, amikor ismét megindult a lehűlés (4. ábra).



4. ábra A léghőmérséklet (talajfelszínen, 20 és 100 cm magasan) és talajhőmérséklet (-5 cm mélységben) alakulása a Tapolcai-karszt egyik töbreiben egy zivataros nyári napon

A fenti jelentős időjárási változások hatására a Tapolcai-karszt talajrétegeiben a július 30-án reggeltől estig mért CO<sub>2</sub> értékek nem a szokásos napi trend szerint alakultak. A CO<sub>2</sub> koncentráció emelkedése csak kora délutánig tartott, azután a délutáni nyári zápor miatt visszaesett, és csak a zápor utáni késő délutáni felmelegedés hatására kezdett növekedni ismét. A talaj három különböző mélységében (-5 cm, -20 cm, -30 cm) mért értékek e szerint a trend szerint alakultak, de az időjárási tényezők zavaró hatása nem egyforma mértékben volt kimutatható bennük. A legnagyobb változást a -5 cm-es felszín közeli szintben tapasztaltuk, ahol a lehülés és a csapadék mikrobiális tevékenység aktivitására gyakorolt hatása a legszembetűnőbben jelentkezett. Nyilvánvaló, hogy a talaj legfelső rétege van leginkább kitéve az időjárás változás hatásainak, pl. a hőmérséklet napszakos változásának vagy az esőnek, amely nyomán – egy intenzív csapadékhullást követően – a talaj pórusai vízzel telítődhetnek. Ezáltal időszakosan anoxikus körülmények is kialakulhatnak a talaj felső szintjében, ami csökkenti a mikrobák biológiai aktivitását (5. ábra).



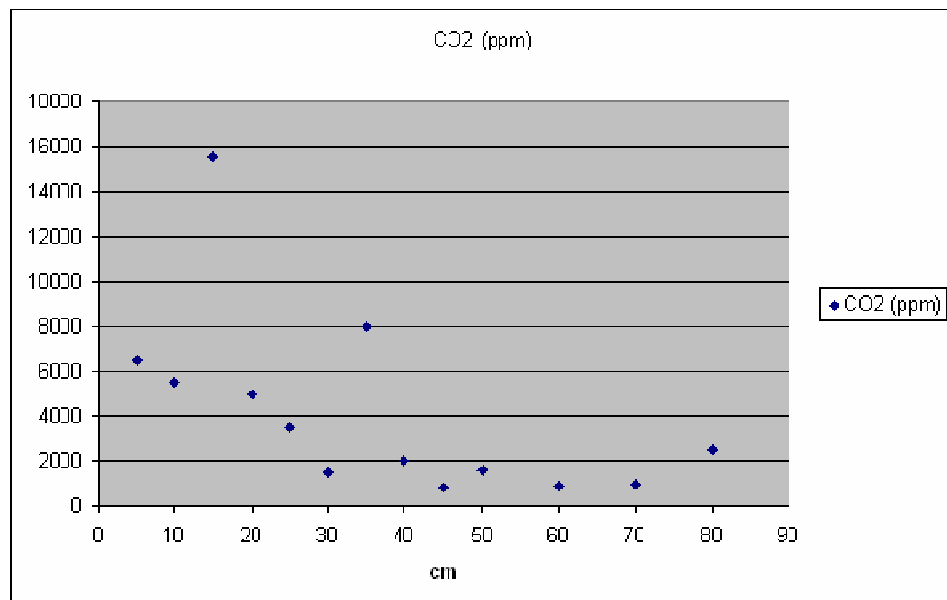
5. ábra A Talajlevegő szén-dioxid koncentrációjának (ppm) változása a Tapolcai-karszt egyik töbörben (TA) (-5, -20, -30 cm mélységben)

Párhuzamosan végzett mikroklíma és CO<sub>2</sub> méréseink bebizonyították a korábban már mások által is feltételezett kapcsolatot a meteorológiai tényezők és a mikrobiális CO<sub>2</sub> termelés között, és néhány új összefüggés felismerésére is alkalmat adtak. A napos, borult és esős időjárás váltakozása a felszín közeli rétegekben jelentős hőmérsékletváltozást eredményez. A hőmérséklet emelkedése (bizonyos határok között) a talajban élő mikrobáknál az enzimaktivitás emelkedésével jár együtt, így magasabb hőmérsékleten nagyobb a szervezetek anyagcsere intenzitása, és ezzel párhuzamosan a szén-dioxid termelődés mértéke is. Természetesen a valóságban ennél bonyolultabb a helyzet. A magasabb rendű növények gyökérlégzése és a

talajban élő állatok légzése is szerepet játszik a biogén CO<sub>2</sub> termelésben, amelyeknek a hatása jelentősen csökken a mélységgel. A most befejezett kutatási projektben rendelkezésünkre álló eszközökkel azonban ezeknek a mértékét külön nem tudtuk mérni. Azonban azt valószínűsítjük, hogy a mikrobiális eredetű szén-dioxid termelés legnagyobb részéért feltehetően az aerob kemoorganotróf anyagcserét folytató, vagyis a szerves anyagok lebontását oxigén jelenlétében végző szervezetek lehetnek felelősek.

#### **A talajlevegő szén-dioxid koncentrációjának napi dinamikája, mélységfüggése**

A szén-dioxid-koncentrációjának mélységfüggését a mérések finomításával, 5 cm-es sűrítésével kívántuk igazolni, ill. pontosítani. A Tapolcai-karszt mérési helyszínéként szolgáló töbör alján (TAA) (ábra) egy 80 cm-es talajszelvényt mélyítettünk barna erdőtalajban egész a szálkő aljzatig. A részletesebb mérések alátámasztották a korábbi vizsgálatok eredményeit. A felszíntől lefelé haladva 6000 ppm-ről (-5 cm) 15500 ppm-re (-15 cm) emelkedett a talajlevegő szén-dioxid-koncentrációja (ez volt a legmagasabb érték, amit a Tapolcai-karszton mértünk), majd fokozatosan csökkenni kezdett. 30 cm mélységben már csak 1500 ppm-et észleltünk. Egy másik szintben, 35 cm-en is kiemelkedően magas értéket (8000 ppm) mértünk, ami feltehetően az agyagbemosódás felső szintjén kialakult vízáramlási pályához köthető, ahol a mikrobák életfolyamataihoz kedvezőbb feltételek állnak rendelkezésre. Alatta 40 cm mélységben a keményebb és tömöttebb talajszintben már csak 2000 ppm értéket kaptunk és onnan kezdve alig változott a koncentráció (1500-2000 ppm) (6. ábra).



6. ábra A Talajlevegő szén-dioxid koncentrációjának (ppm) változása a mélység függvényében a Tapolcai-karszt egyik töbörben (TA)

Mérései eredményeinkből arra következtettünk, amit azután a mikrobiológiai vizsgálataink is megerősítettek (lásd a mikrobiológiai fejezetben), hogy a legmélyebb

talajrétegek mikrobaközösségeinek biotassza mennyisége (élőanyag tömege) sokkal kisebb, mint a felsőbb rétegeké és a közösség összetétele is erőteljesen különböző.

A mikrobiológus kollégákkal 2009-óta közösen terveztük meg és bonyolítottuk le a talajban élő mikrobaközösségeinek biotassza mennyiségének (élőanyag tömege) és aktivitásának mérését, amit a talajrespiráció és a szubsztrát indukált respiráció mérésével követtünk nyomon (Szili-Kovács et al. 2009). A talajrespiráció (RESP) és a szubsztrát indukált respiráció (SIR) meghatározása a CO<sub>2</sub>-képződés alapján gázkromatográffal történt. A (SIR) a telítési koncentrációban jelenlévő, könnyen hasznosítható glükóz hatására adott respirációs válasz, mely arányos a mikrobiális biotassza nagyságával (Szili-Kovács 2004). A terepi és mikrobiológiai vizsgálataink alapján arra következtettünk, hogy 70-80 cm mélységben már nincs elegendő oxigén a lebontó folyamatokhoz, ezért inkább az anaerob légző szervezetek jelenlétével számolhatunk, ami megmagyarázhatja a csökkent mértékű szén-dioxid-termelést. A karsztos korrózió szempontjából fontos szén-dioxid-tartalom talajtípustól való függését a jövőben további mérésekkel szeretnénk meghatározni, ill. pontosítani.

### **Az epikarsztos rendszer talajainak vizsgálata**

Munkánk célja az volt, hogy a két, egymástól merőben eltérő geológiájú, geomorfológiájú karsztterület talajtakarójáról részletes terepi és laboratóriumi vizsgálatok elvégzését követően új információkat adjunk, a talajok fizikai-kémiai tulajdonságairól és karsztkorróziót befolyásoló szerepükről egyaránt. Ehhez a Tapolcai-karszton egy É-D irányú szelvény mentén végeztünk terepi megfigyeléseket és egyes talajszelvények esetében részletes laborvizsgálatokat is; az Aggteleki-karszton pedig néhány, egymástól távolabb elhelyezkedő (Derenk, Aggtelek, Vörös-tó környéke) referencia-pont talajainak terepi és laboratóriumi vizsgálatát, valamint egy kisebb mintaterület részletes talajtérképezését végeztük el.

A terepi felvételezés során a szelvények hagyományos morfológiai leírását végeztük el (a szintek méretei, szín, fizikai féleség, szerkezet, kövesség (a durva vázrészek aránya), gyökérsűrűség stb.).

Az ásott szelvények besorolásához és további jellemzéséhez az alábbi laboratóriumi vizsgálatokat végeztük el: Buzás (1988) alapján mértük a desztillált vizes és KCl-os pH-t, a karbonáttartalmat, a hidrolitos (y<sub>1</sub>) és a kicserélődési (y<sub>2</sub>) savanyúságot, valamint a Kuron-féle higroszkóposzást (hy). A humusztartalom mennyiségi meghatározását Tyurin módszere alapján végeztük, a humuszminőséget a Hargitai-féle módszerrel (Buzás 1988) meghatározott humuszstabilitási számmal (Q: a NaF-os és NaOH-os kioldások után VIS-tartományban mért abszorbancia-értékek aránya) jellemeztük. A szemcseösszetételt a MSZ szerinti Na-pirofoszfátos előkészítés és 6 órás rázatás után Fritsch Analysette 22 Fraunhofer elven működő lézeres diffraktométerrel (mérési tartomány: 0,10–677,07 µm) mértük, ill. az agyagfrakció (<2 µm méretű szemcsék) mennyiségét a hagyományos pipettás módszerrel is meghatároztuk.

Talajmonolitokon és kismintákon esőszimulációs kísérleteket állítottunk össze, amelynek során e bolygatatlan mintákon átszivárgó talajoldatok fiziko-kémiai (pH,



karbonát- és hidrokarbonát-tartalom) valamint mikrobiológiai paramétereit vizsgáltuk és hasonlítottuk össze, a mikrobiális befolyásoltságú karsztkorrózió jellemzése céljából. A zárójelentés korlátozott terjedelme miatt csak az esőszimulációs kísérletek eredményeiről számolunk be.

### **A két karsztterület talajain végzett laboratóriumi esőszimulációs kísérletek eredményei**

Az egyes talajtípusok mikrobiális karbonátoldó hatásának azonos körülmények között történő összehasonlítására laboratóriumi kisminta modellrendszereket állítottunk össze, Zámbo (1998) módszerét kissé módosítva: 6 cm magasságú talajoszlopokat helyeztünk 4 cm átmérőjű üvegcsövekbe, melyeket felül steril baktériumszűrő dugóval zártunk le. A dugókon keresztül a csapadékhoz hasonló összetételű lágyvizet jutattunk be. A talajok alá műanyagszűrő, illetve szűrőpapír közé egyenként 20 g tömegű, analitikai pontossággal lemért mészkőport helyeztünk, kémiaiilag inert filterbe csomagolva. A rendszereket végül átfúrt gumidugóval zártuk le. A frissen laborba szállított talajokat 20°C hőmérsékletű steril lágyvízzel esőztettük, hevesebb csapadéknak megfelelő 20 mm/óra (kísérletünkben az ennek megfelelő (5 ml / 10 perc) intenzitással, 6 órán keresztül. Az átszivárgó vizet steril műanyag edényekbe gyűjtöttük, majd az így nyert mintákat kémiai, illetve mikrobiológiai vizsgálatoknak vetettük alá. A további elemzésekhez elegendő mennyiségű átszivárgott vizet az első 12 órában fogtuk fel.

Két egymástól független kísérletsorozat eredményeit mutatjuk be (7. ábra), amelyek az alábbiak:

- Nem sterilizált talajminták esőztetését, alattuk a karsztos alapkőzetet szimuláló mészkőporral, a mikrobiológiailag aktív talajok karsztkorróziós hatásának vizsgálatára (1. kísérlet).

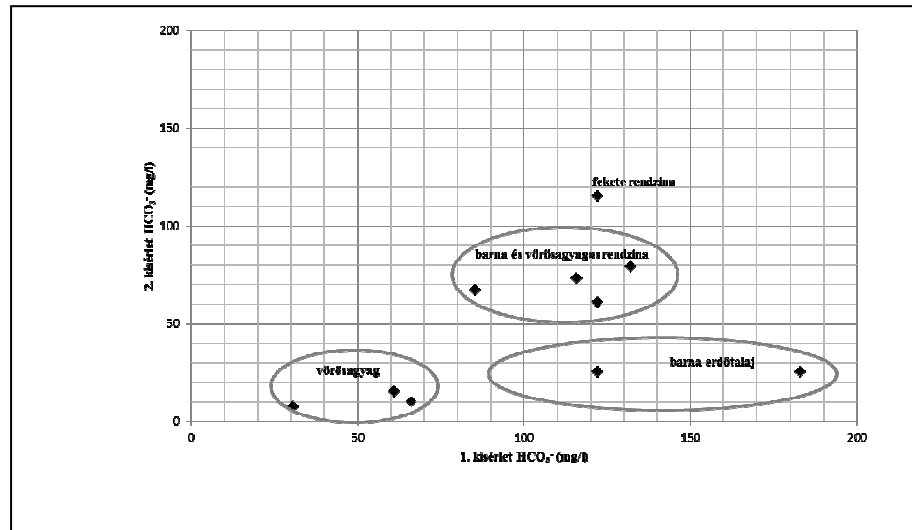
- Nem sterilizált talajminták esőztetését, karsztos alapkőzet nélkül (2. kísérlet), így a talajból esetlegesen kioldódott kalcium-karbonát miatt az 1. kísérletsorozat során keletkezett hiba kiküszöbölhetővé vált. A vízminták hidrogénkarbonát-tartalmának meghatározását az érvényes MSZ (448– 11:1986) szerint végeztük.

A kísérletekhez 10 db talajmintát (8 aggteleki, 2 tapolcai) választottunk ki, ezek különböző típusú rendzinák, barna erdőtalajok, vagy töbrök alján felhalmozódott vörösayagos üledékek voltak.

A kémiai analízis során a talajtípusok karsztkorróziós hatásuk szempontjából elkülönültek egymástól. Az 1. kísérlet esetén az oldott hidrogénkarbonát-tartalom egyértelműen a legcsekélyebb szerves anyagot tartalmazó, mélyebb szinteken elhelyezkedő vörösayagoknál volt a legkisebb. A töbrök pereméről származó barna erdőtalajok humuszosabb felső szintjein átszivárgott vizek ugyanakkor a rendzinákhoz hasonló mértékű hidrogénkarbonát-tartalmat (karsztkorróziós hatást) mutattak. A legnagyobb mészagresszivitást a fekete rendzina talajon átszivárgott víz mutatta.

Az 1. és a 2. kísérlet során mért hidrogénkarbonát-tartalom között csekélyebb a differencia. Ez azt jelenti, hogy a rendzina talajoknál a mészagresszivitás egy része a talaj karbonáttartalmának oldására fordítódott.

A nem sterilizált talajminták felhasználásakor az átszűrődött vízminták baktériumközösségeit DGGE mintázatuk alapján hasonlítottuk össze. A vizsgált minták két nagyobb csoportot képeztek, melyek közül az egyikbe a rendzina, a másikban pedig a vörösayagból kialakult barna erdőtalajok és vörösayagok baktériumközösségei kerültek, amiből arra következtethetünk, hogy az átszivárgó vízben megjelenő mikrobaközösségek összetételét elsősorban a talaj típusa befolyásolta (Knáb et al. 2010).



7. ábra A karsztkorróziós talajhatás különbségei a kisminta kísérletek alapján

### Az epikarsztból gyűjtött talaj- és vízminták mikrobiológiai vizsgálatának és biológiai vízminősítések eredményei

A Gömör-Tornai-karszt és a Tapolcai-karszt eltömődött víznyelőiben kialakult kis tavak közül a Papverme-tó, a Derenki-tó, Vörös-tó, az Aggteleki-tó, illetve az Alsó-Cser-tó és a Pokol-tó komplex vízkémiai és mikrobiológiai jellemzését, valamint biológiai vízminősítését 2009 tavaszán végeztük el. A planktonikus baktériumközösségek mikrobiológiai elemzése és a bentikus makrogerincteleneken alapuló biológiai vízminősítés alapján egyaránt a Gömör-Tornai-karszt tavai hasonlítottak legjobban egymáshoz, míg a tapolcai Alsó-Cser-tó és Pokol-tó ezektől és egymástól lényegesen különbözött. A tapolcai kisvizek magasabb mikrobiális csíra- és sejtszám, valamint koliform értékekkel voltak jellemezhetők, mint a Gömör-Tornai-karsztról származók. Ugyanakkor a legnagyobb bakteriális genetikai diverzitást is az Aggteleki- és Vörös-tó vizéből mutattuk ki. A vízkémiai paraméterek alapján az Aggteleki-tó különült el legjobban a többi kisvíztől, magas ammónia-, foszfát- és szulfáttartalma vélhetően a közeli település szennyező hatásával hozható összefüggésbe.

Laboratóriumi esőszimulációs kísérletek céljából 2009 júniusában a Gömör-Tornai-karszton, majd 2009 szeptemberében a Tapolcai-karszton vettünk nagyméretű talajmonolit mintákat (40\*40\*20 cm). A kísérlet során a talajokon átszűrődött vízmintákban lévő baktériumközösségek genetikai diverzitását denaturáló gradiens gélelektroforézis (DGGE) segítségével hasonlítottuk össze. Eredményeink alapján az

átszivárgó vízben megjelenő mikrobaközösségek szerkezetét elsősorban a talaj típusa befolyásolta, és a Tapolcai-karsztról származó minták baktériumközösségei a gélben megfigyelhető csíkok elhelyezkedése alapján határozottan elkülönültek a Gömör-Tornai-karsztról származóktól.

A talajmonolit kísérletek eredményeinek figyelembevételével 2009 őszén összesen 17 eltérő típusú és/vagy különböző mélységből származó talajminta részletes és összehasonlító mikrobiológiai vizsgálatára került sor. A mikrobiális biomassza C-értékek valamennyi minta esetében a biomassza N-mennyiségek többszörösének adódtak. A legkisebb MBC/MBN arányt a legsekélyebb talajréteggel jellemezhető aggteleki és tapolcai minták esetében, míg a legnagyobb értéket a 70-100 cm-es talajmélységből származó minták esetében határoztuk meg. Jellemző volt, hogy a felszíni és felszín közeli (20 cm-es) mintákban mértük a nagyobb biomassza értékeket, míg az 50 cm-es vagy annál mélyebb rétegekben nagyon alacsony értékeket kaptunk. Az egyes talajminták alaprespiráció, és szubsztrát indukált respiráció értékei esetében is a felszíni és felszín közeli mintákban mértük a magasabb értékeket, míg az 50 cm-es vagy annál mélyebbről származó minták esetében jóval alacsonyabb respirációs aktivitást kaptunk.

A talajmintákra jellemző baktériumközösségek DGGE mintázatuk alapján három csoportba különültek. Legjobban a rendkívül sekély talajréteggel rendelkező aggteleki és tapolcai rendzina típusú talajminták baktériumközösségeinek szerkezete különbözött a többitől. Kisebb mértékben eltértek egymástól a felszíni vagy felszínközeli talajmintákból és az 50 cm-ről vagy annál mélyebb talajrétegekből származó minták baktériumközösségei.

Ugyanezen talajminták felhasználásával laboratóriumi esőszimulációs kísérleteket is végeztünk, és az így gyűjtött vízminták baktériumközösségeit is összehasonlítottuk DGGE mintázatuk alapján. A vizsgált minták két nagyobb csoportot képeztek, melyek közül az egyikbe a rendzina, a másikba pedig a vörös-barna erdei talajok és vörös agyagok baktériumközösségei kerültek, amiből arra következtethetünk, hogy az átszivárgó vízben megjelenő mikrobaközösségek összetételét elsősorban a talaj típusa befolyásolta.

A Gömör-Tornai- és a Tapolcai karsztról 2010 őszén gyűjtött felszíni talajmintákkal került sor részletes tenyésztésen alapuló és tenyésztéstől független molekuláris klónozás módszerekkel végzett bakteriális diverzitás vizsgálatra. A talajmintákban a minta típusától és az alkalmazott táptalaj összetételétől függetlenül átlagosan 106-107 TKE/g (TKE = telepképző egység) csíraszám értékeket határoztunk meg tenyésztésen alapuló módszerrel. A 4 mintából származó összesen több mint 400 baktériumtörzs és molekuláris klón 16S rRNS génjének bázissorrend elemzésén alapuló vizsgálatok során legnagyobb arányban a Proteobacteria és az Actinobacteria törzs képviselőit mutattuk ki. Emellett a baktériumtörzsek között a Firmicutes, a molekuláris klónok között az Acidobacteria törzs tagjai voltak még gyakoriak. A baktériumtörzsek között számottevő arányban azonosított Bacteroidetes törzs képviselői a klónkönyvtárakban csekély számban voltak jelen. A klónozással azonban olyan filogenetikai törzsek (Acidobacteria, Chloroflexi, Cyanobacteria, Verrucomicrobia, Gemmatimonadetes) képviselőit is kimutattuk, amelyeket speciális

tápanyag vagy tenyésztési igényük miatt nem tudtunk tenyésztésbe vonni. Az egyes filogenetikai törzsek képviselőinek megoszlása mintánként jelentős eltéréseket mutatott: az aggteleki talajminta esetében a Firmicutes és az Actinobacteria, a vörösvízi és a tapolcai illegális hulladéklerakó melletti talajmintában az Actinobacteria, míg az Alsó-Cser-tó melletti talajmintában a Gammaproteobacteria képviselői fordultak elő a legnagyobb arányban.

A legtöbb baktériumtörzset, a két karszterületről nagyjából azonos arányban, a *Bacillus* és a *Streptomyces* nemzetségek tagjaként azonosítottuk. A Gammaproteobacteria osztály képviselői között a *Pseudomonas* nemzetség tagjai bizonyultak a leggyakoribb előfordulásúnak. Tenyésztéssel a talajok baktériumközösségeiben Gram-pozitív dominanciát tapasztaltunk, és elsősorban az aerob, kemoorganotróf heterotróf anyagcserét folytató, talajokban gyakori előfordulású, nagy tűrőképességű és széleskörű anyagcsere-potenciállal bíró szervezeteket tudtuk kimutatni. A molekuláris klónok között az aggteleki és a tapolcai illegális hulladéklerakó melletti talajminták esetében legnagyobb arányban az Actinobacteria törzs képviselői fordultak elő. A vörösvízi és az Alsó-Cser-tó melletti talajmintákban közel azonos taglétszámmal 2-2 domináns csoport volt jelen. Az előbbi esetben az Acidobacteria és az Alphaproteobacteria, az utóbbi esetben az Alphaproteobacteria és az Actinobacteria.

### **Vizes élőhelyek növényzetének környezeti állapotfelmérése nedvességi grádiensek mentén a vizsgálatra kijelölt epikarsztos területeken**

A vizes élőhelyek (wetlands) jellemzője az erősen mozaikos szerkezet, amely különböző típusú ökológiai foltok (élőhely típusok) egysége. Ezek sokszor komplexet alkotnak. Vizes élőhelyeken fontos szerepe van az ökotónoknak, amely két formáció (habitusában eltérő élőlényközösség) határán szegélyszerűen kialakult átmeneti természetű élőhely. A szegélyeken kialakult közösség fajai mindkét szomszédos társulásból származnak, így a fajsűrűség kiemelkedően nagy. Természetvédelmi és tájökológiai szempontból az ilyen helyek gyakran kitüntetettek, mivel számos ritka faj él itt, illetve innen történhet a fajok elterjedése a kisebb időszakos tavakba. A vizes élőhelyek természeti, táji értékei ma már hazánkban is vitathatatlanok.

A vizes élőhelyek legkisebb zavarásra is érzékenyen reagáló, igen sérülékeny ökológiai rendszerek. A környezetterhelés itt sokkal gyorsabban és markánsabban jelentkezik, így jó indikátorai a természetes és antropogén diszturbációknak (zavarásoknak). A zavarás eredménye a diszturbált és degradált állapot, ami az adott élőhelyen előforduló növényfajok természetvédelmi érték kategóriák szerinti eloszlása alapján jól dokumentálható (Borhidi 1993). A környezeti terhelések (diszturbációk) a vizes élőhelyekhez közeli epikarsztos területeken ugyan később jelentkeznek, de tekintettel arra, hogy a változásokat gyorsan jelző vizes élőhelyek és az epikarsztos területek egységes ökológiai rendszert alkotnak, így a vizes élőhelyeken észlelt degradáltság fokából fontos predikciókat lehet tenni (következtetéseket lehet levonni) az epikarsztos élőhelyek várható változásaira.

A két mintaterület (Aggtelek és Bakonyvidék) vizes élőhelyei közül két-két természetes/természetközeli és két-két antropogén zavarásnak erősen kitett kis tó

összehasonlító cönológiai vizsgálatát végezzük el. A felvételezés a víztest legmélyebb pontjától kiindulva a partig, illetve a környező teresztris társulásig egy-egy keresztmetszely mentén 2 x 2 méteres egymással érintkező négyzetekben történik a tavi zonációnak megfelelően. Minden egyes kvadrátban felmérjük a jelen levő növényfajokat és azok százalékos borítását.

A jól elkülöníthető zónák növényzetét két irányból elemezzük: egyrészt a zavarással szembeni viselkedést jellemző természetes állapotot kifejező természetességi értékek és a fajok cönotípusa szerint; másrészt az ökológiai indikátor értékek közül a talaj pH itt és a talajvíz illetve talajnedvesség indikátor értékei szerint (Borhidi 1993). A módszer elvi alapját az képezi, hogy a növényzetet alkotó fajok a különböző tényezőkkel (vízellátottság, hőmérséklet, talajreakció, zavarás stb.) különböző érzékenységet mutatnak. Ennek következtében előfordulásuk a környezeti tényezők meghatározott értéktartományához kapcsolódik, így azt indikálják is.

### **Az epikarsztos rendszerben végzett egyéb vizsgálataink rövid összefoglalása**

Az emberiség a tájhasználat során a természeti tájat átalakítja, kultúrtájává degradálja. A beépített és a gazdálkodásba vont területek kiterjedése növekszik, a természetes élőhelyek visszaszorulnak, megváltozik a tájhasználat az idők során, amely hatással van a karsztos rendszer működésére is. E változások nyomon követésére és a várható hatások elemzése céljából készítettünk **felszínborítási térképeket** a vizsgált helyszínekről.

A kutatásainkba bevont két mintaterületről (Baradla vízgyűjtőterülete és Tapolcai-karszt négy időpontban (I. katonai felmérés – 1774; II. katonai felmérés – 1856; 1:10000 EOTR térképek – 1985; SPOT IV felvételek – 2006) készült térképek és úrfelvételek alapján készítettünk összevethető felszínborítási térképeket. Az egyes időpontok térképei természetesen eltérő tematikus tartalommal készültek, összehasonlíthatóságuk érdekében az 1985-ös és 2006-os felszínborítási térképek több kategóriáját összevontuk.

Az Európai Unió víz- és környezetgazdálkodási politikája, a Víz Keretirányelv célul tűzte ki, hogy 2015 végéig minden felszíni és felszín alatti vizet jó állapotba kell hozni. A **karsztsérülékenységi vizsgálatok** nagy segítséget jelenthetnek a fenntartható vízgazdálkodás és tájhasználat kialakításában, a környezeti hatásvizsgálatoknál és a döntéshozatalban, így több országban is a törvényhozás részét képezik.

Munkánkban egy sérülékenységi szempontból különösen érdekes területtel, a mozaikosan fedett Tapolcai-karszttal és környékével foglalkoztunk. A felszín alatt több km-es barlangjáratok húzódnak, és a felszínen is találunk különböző karsztformákat, elsősorban töbröket. A terület ennek ellenére szinte teljes egészében kívül esik a Balaton-felvidéki Nemzeti Park határain, és antropogén hatásoknak erősen kitett. Számtalan illegális szeméttlerakó található itt, de a kőbányászat, vagy a legeltető állattartás is lehet potenciális veszélyforrás a karsztvízre vonatkozóan.

### **Köszönetnyilvánítás**

Az OTKA által támogatott kutatásainkból eddig mintegy 20 publikáció született, az eredmények további feldolgozása folyamatban van, várhatóan további tanulmányok születnek belőle. A zárójelentésünkben csak vázlatosan érintett kutatási eredmények könyvben történő összefoglalását tervezzük, melynek szerkesztése folyamatban van.

Végül szeretnénk köszönetet mondani az OTKA illetékes kuratóriumának a négy éven keresztül folyósított támogatásért, ami nélkül a bemutatott eredmények nem születhettek volna meg.

### **Irodalom:**

- Bárány I. – Kevei & Gunn, J. (eds) 1999: Essays in the ecology and conservation of karst, Acta Geographica Tomus 36. Szeged, pp. 13-30.
- Bárány Kevei I. 1998: Geoeocological system of karst. Acta Carsologica 27. 1. Ljubljana, pp. 13-25.
- Borhidi A. 1993: A magyar flóra szociális magatartás típusai, természetességi és relatív ökológiai értékszámai. A Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium Természetvédelmi Hivatala és a Janus Pannonius Tudományegyetem kiadványa. Pécs, p. 93.
- Buzás I. (szerk.), 1988. Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 2. A talajok fizikai–kémiai és kémiai vizsgálati módszerei. 103–106. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.
- Jakucs L. 1971: A karsztok morfogenetikája. A karsztfejlődés variációi. Akadémiai Kiadó Budapest, p. 310.
- Jakucs L. 1980: A karszt biológiai produktum. Földrajzi közlemények 28. 4. pp. 331-339.
- Keveiné Bárány I. 2009: A karsztok ökológiai rendszere. JATE Press Szeged, p. 121.
- Knáb M. – Kiss K. – Lehner Á. – Szili-Kovács T. – Palatinszky M. – Márialigeti K. – Móga J. – Borsodi A. 2010: Hazai epikarszt rendszerek talajaiban előforduló mikrobaközösségek szerkezetének és aktivitásának összehasonlító elemzése. Karsztfejlődés XV. Szombathely, pp. 35-48.
- Móga J. – Kiss K. – Szabó M. – K. Borsodi A. – Kéri A. – Mari L. – Knáb M. – Iván V. 2011: Természeti és antropogén hatások vizsgálata a Tapolcai-karszt epikarsztos rendszerében. Karsztfejlődés XVI. Szombathely. 2011 pp. 185-201.
- Szili-Kovács T. – Zsuposné Oláh Á. – Kátai J. – Villányi I. – Takács T. 2009: Talajbiológiai és talajkémiai változók közötti összefüggések néhány tartamkísérlet talajában. Agrokémia és Talajtan 58: 309-324.
- Szili-Kovács T. 2004: Szubsztrát indukált resiráció a talajban. Agrokémia és talajtan. 53: 195-214.
- Szili-Kovács T. – Török K. 2005: Szénforráskezelés hatása a talaj mikrobiális aktivitására és biomasszájára felhagyott homoki szántókon. Agrokémia és Talajtan. 54: 149–162.
- Zámbó L. 1998. Talajtakaró. In: Az Aggteleki Nemzeti Park. (Szerk: BAROSS G.). Mezőgazda Kiadó. Budapest. pp. 95–117.
- Zámbó L. 2001: A mikrobiális talajhatás morfológiai jelentősége a karsztosodásban. Földrajzi konferencia, Szeged.